doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.010

圆捆机链齿式饲草碎料均匀供料装置设计与试验

马朋勃[1]　李闻曦[1]　郭　磊[2]　尤　泳[1]　喻　晨[2]　李思标[1]　帕合尔鼎·阿布来提[2]
(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 新疆维吾尔自治区农业科学院农业装备研究所, 乌鲁木齐 830002)

摘要: 针对圆捆机作业过程中饲草碎料供料不均匀,供料量波动大,甚至堵塞等问题,提出了一种适用于固定式圆捆机的链齿式饲草碎料均匀供料方法,并设计了均匀供料装置。该装置主要由输送链板、扰动链齿、顶板、驱动部件组成,利用多排扰动链齿的扰动作用实现对饲草碎料的连续均匀供料。台架试验表明:在整个供料过程中,扰动链板可以有效破坏上层物料间的纤维交织和黏附,改善料仓中物料的流动状态,下层物料会在输送链板的作用下持续稳定供料,实现物料的均匀排出,验证了链齿式供料方式的合理性。在台架试验的基础上,试制了供料装置并装机开展试验,以扰动链板转速、喂入辊转速作为试验因素,以扰动链板平均油压、供料时间、出仓物料横向高度变异系数作为评价指标,进行了两因素五水平中心复合正交试验,获得了装置最佳工作参数,结果表明:当使用扰动链板转速 13 r/min、喂入辊转速 85 r/min 的工作参数组合时,供料效果最好,此时平均油压为 1.48 MPa,供料时间为 128 s,高度变异系数为 44.81%,满足均匀供料作业要求。

关键词: 圆捆机; 饲草碎料; 供料装置
中图分类号: S225.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)11-0113-09　　**OSID**:

Design and Experiment of Chain-tooth Type Chopped Forage Uniform Feeding Device for Round Baler

MA Pengbo[1]　LI Wenxi[1]　GUO Lei[2]　YOU Yong[1]　YU Chen[2]　LI Sibiao[1]　PAHEERDING·Abulaiti[2]
(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Agricultural Equipment Institute*, *Xinjiang Academy of Agricultural Sciences*, *Urumqi* 830002, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of uneven feeding of chopped forage, significant fluctuations in feed volume, and even blockages during round baler operations, a chain-tooth-type method for uniform feeding of chopped forage suitable for stationary round balers was proposed, along with the design of a uniform feeding device. The device primarily consisted of a conveyor chain plate, agitating chain teeth, a top plate, and a drive unit. It utilized the agitating action of multiple rows of chain teeth to achieve continuous, uniform feeding of chopped forage. Bench testing demonstrated that throughout the feeding process, the agitating chain plates effectively disrupted fiber entanglement and adhesion between upper-layer materials, improving material flow within the hopper. Lower-layer materials were continuously and stably fed by the conveyor chain plates, achieving uniform material discharge and validating the rationality of the chain-tooth feeding method. Building upon bench testing, a prototype feeding device was manufactured and installed for field trials. A two-factor, five-level central composite orthogonal test was conducted, with agitating chain plate speed and feed roller speed as experimental factors, and average oil pressure of the agitating chain plate, feeding time, and coefficient of variation in the lateral height of discharged material as evaluation metrics. This yielded the device's optimal operating parameters. Results indicated that the optimal feeding performance was achieved with a combination of 13 r/min for the agitated chain plate and 85 r/min for the feed roller. At this configuration, the average oil pressure was 1.48 MPa, the feeding time was 128 s, and the height coefficient of variation was 44.81%, meeting the requirements for uniform feeding operations.

Key words: round baler; chopped forage; feeding device

收稿日期: 2025-08-01　修回日期: 2025-08-30
基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2023B02032-2)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-34)
作者简介: 马朋勃(1995—),男,博士生,主要从事牧草机械化研究,E-mail: mpbvic@163.com
通信作者: 尤泳(1980—),男,副教授,博士生导师,主要从事牧草机械化研究,E-mail: youyong@cau.edu.cn

0 引言

在饲草收获和秸秆饲料化利用过程中,将碎料压缩成捆是关键作业环节之一[1-4],配套的作业装备主要分为方捆机和圆捆机[5-6]。其中,圆捆机因适应性强、操作简单、造价低廉等特点,在我国饲草收获设备中占有重要地位[7]。圆捆机的作业过程是通过卷积成型原理将饲草碎料压缩成圆捆,饲草料的持续顺畅喂入对于提高打捆效率和作业质量尤为重要,也是影响草捆密度均匀性和一致性的重要因素[8]。

国内外研究学者已围绕圆捆机成型过程开展多项研究。在圆捆机成型仓结构优化方面,高东明等[9]提出了圆捆成型仓对数螺线式喂入结构,解决了粗大高含水率硬实类物料在进入成型仓时易发生堵塞的问题,但未分析供料结构对喂入过程的影响;针对供料状态检测,李叶龙等[10]建立了卷捆功耗分量与关键生产信息间的关系函数,实现对圆捆机工作状态的识别,但未提及非连续喂入时的适应性;针对供料物料方向,雷军乐等[11]研究发现杂乱铺放状态的最大压缩力显著高于横向铺放,但试验采用闭式静态压缩,未模拟圆捆机连续卷捆过程中的动态压缩;针对喂入过程,ZHAO 等[12]采用离散元法模拟稻秆喂入过程,但未考虑秸秆含水率对负载的影响;在供料物料方面,房佳佳等[13]采用广义麦克斯韦尔模型研究紫花苜蓿卷压过程,陈美舟等[14]从复合材料接触力学角度分析全株青贮玉米破坏特征,此外,学者还探究了小麦、水稻、燕麦、玉米等秸秆[15-16]的力学行为,并建立离散元模型[17],对秸秆压缩特性[18]、流变特性[19-20]也进行相关分析;另有学者在喂入量的监测和控制技术方面同样开展了相关研究[21],采用的方法可概括为动态称重测量法[22-23]、高速摄像分析法[24]和压力监测法[25]。

以上研究在解决圆捆机喂入口堵塞、检测圆捆机供料状态以及控制喂入量等方面取得了成果,但在圆捆机均匀顺畅供料等方面研究较少。场地固定作业的打捆机多采用间隔供料方式,当饲草喂入量突然增大或含有高含水率物料时,极易在喂入区域形成堵塞,导致无法成捆、草捆密度不均、一致性差的问题,非均匀供料还易造成打捆机构瞬时负荷急剧增加,引发机械故障。本研究根据固定式打捆机供料机构特征,通过台架试验分析饲草碎料供料过程的运移规律,设计一种链齿式饲草碎料均匀供料装置,并通过样机试验测试供料结构性能和优化工作参数,为固定式打捆机喂入结构优化提供理论和应用支撑。

1 链齿式供料过程分析

1.1 作业方式与原理

在固定式圆草捆机作业过程中,饲草碎料供料作业效率主要受碎料物理特性(纤维长度、含水率等)和机械输送方式的影响。本研究提出一种链齿式供料方式,通过将持续扰动与分层输送相结合,利用多排扰动链齿的扰动作用,增强料仓中物料流动性,使物料持续均匀通过排料口,实现对饲草碎料的连续均匀供料,如图 1 所示。

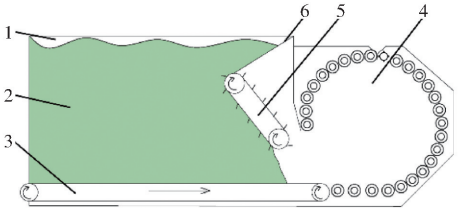


图 1 链齿式供料方式作业示意图

Fig. 1 Schematic of chain-tooth type feeding method

1. 料仓 2. 饲草碎料 3. 输送链板 4. 成捆仓 5. 扰动链板 6. 顶板

作业开始时,输送链板运动推动仓内饲草碎料整体右移,导致左侧形成空腔;左侧表层物料在周围物料挤压、机构振动及重力等作用下发生塌落,并依其自然堆积角重新堆积,形成稳定的新料堆。右侧物料由扰动链板持续向左上方输送至料堆表层后滚落,此过程既实现物料回推以防喂入口堵塞,又通过持续扰动增强整个料仓物料的动态流动。底层物料始终受链板带动向右输送,经排料口均匀排出,保证了物料流动的连续性与稳定性。

1.2 试验台整体结构

为了研究物料在供料过程中的物料流变化情况,搭建链齿式供料试验台并开展预试验,验证链齿式供料方式可行性,并分析链齿式供料方式作业过程中饲草碎料运移规律,及扰动链板在各个供料时期对饲草碎料的扰动作用。链齿式供料试验台由料仓、输送链板、喂入辊、扰动链板、顶板等组成,其中,侧壁采用透明亚克力板,输送链板、喂入辊、扰动链板分别由伺服电机独立提供动力,链齿式供料试验台结构如图 2 所示。

1.3 供料过程分析

1.3.1 材料与方法

试验于 2025 年 4 月 24 日在新疆维吾尔自治区农业科学院农业装备研究所进行,并对试验过程进行视频记录。物料选用 2024 年 10 月制作的裹包青贮,拆包后将物料铺平并充分均散,剔除坚硬的块状物料及异物,并采用随机取样法选取 5 组饲草碎料样本,用烘干法测得饲草碎料平均含水率为

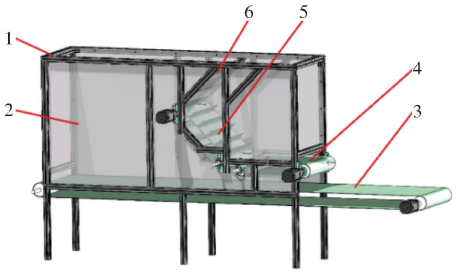


图 2　链齿式供料试验台结构图

Fig. 2　Structural diagram of chain-tooth type feeding test bench

1. 机架　2. 料仓　3. 输送链板　4. 喂入辊　5. 扰动链板　6. 顶板

74.76%。利用斜面法测得物料平均堆积角为 42.85°。试验台料仓尺寸为(长×宽×高)2 000 mm×500 mm×900 mm，试验前，一次性将物料加至链齿式供料试验台料仓中，根据试验台料仓容积，单次加料量为 120 kg。根据预试验结果，设定输送链板线速度为 0.12 m/s，扰动链板线速度为 0.41 m/s，喂入辊线速度为 0.27 m/s。为提高对饲草碎料运移过程的观测效果，从正视和俯视两个视角同时观测并记录整个区间的供料过程。试验结束后，以 6 s 为间隔进行图像截取分析，对相同时刻不同视角的饲草碎料扰动过程进行分析，结果如图 3 所示，图中红色曲线表示表面饲草碎料运动方向；黄色曲线表示底层饲草碎料运动方向以及饲草碎料堆整体运动方向；绿色曲线表示扰动链板对饲草碎料扰动作用后饲草碎料运动方向。

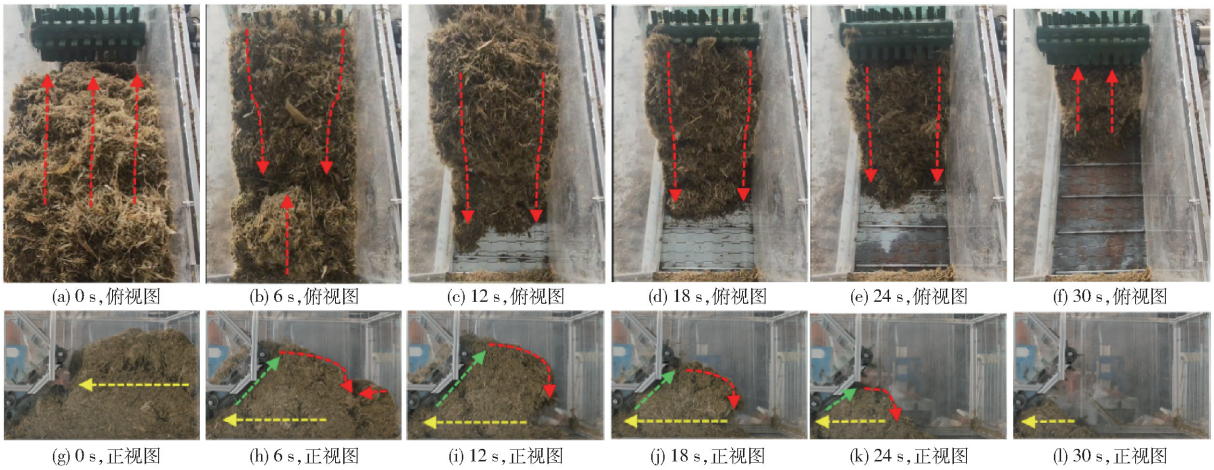


图 3　链齿式供料试验台物料运移变化图

Fig. 3　Material movement change diagrams of chain-tooth type feeding test bench

1.3.2　不同阶段物料运移规律

结合整体运移过程，将链齿式供料方式对物料的动态影响过程分为 3 个阶段：

(1)初始运移阶段

试验台启动运行后，料仓中的饲草碎料首先在输送链板作用下，料堆整体向左运动，如图 3a 红色曲线和图 3g 黄色曲线所示；当饲草碎料堆最右侧与料仓后壁之间出现足够空间后，最右侧小部分物料坠落并形成新的物料堆，如图 3b、3h 红色曲线所示。同时，最底层物料在输送链板的带动下，顺畅通过排料口，如图 3h 黄色曲线所示。

(2)链齿扰动阶段

当饲草碎料堆最左侧碎料与扰动链板接触后，开始以链齿主导的扰动运移阶段。饲草碎料受到扰动链板剪切与挤压等作用影响，靠近链齿区域(0～50 mm)物料受链齿直接带动作用，上层物料间的纤维交织和黏附被破坏，从饲草堆中脱离，随着扰动链板逐渐向右上方运动，如图 3h 绿色曲线所示，到达料堆顶部后，大部分物料向右滚落，小部分物料被带至顶板处，如图 3h 红色曲线所示；同时，饲草碎料在扰动链板和料仓侧壁的共同作用下，由两侧持续向中间扩散运移，如图 3b 红色曲线所示。随着输送链板的继续运行，新的物料堆被持续滚落的饲草碎料覆盖，再次成为一个物料堆，如图 3c、3i 红色曲线所示。当运行至 18 s 时，料仓中剩余的物料高度已减少至低于扰动链板的最高点，顶板处不再有饲草碎料堆积现象；当运行至 24 s 时，扰动链板对饲草碎料的扰动作用随着物料量的减少逐渐减弱，但饲草碎料依然保持沿扰动链板“爬升–滚落”的状态。

(3)底部输送阶段

当料仓中剩余的物料高度减少至低于扰动链板的最低点时，即扰动链板无法与饲草碎料接触，开始底部输送阶段，饲草碎料在输送链板带动下，顺利通过排料口，整个供料作业结束，如图 3f、3l 红色曲线和黄色曲线所示。供料试验共用时 35 s，且物料始终在喂入辊和输送链板之间连续排出。

因此，在整个供料过程中，扰动链板可以有效破坏上层物料间的纤维交织和黏附，改善料仓中物料

的流动状态,下层物料会在输送链板的作用下持续供料,该方式可以实现物料的均匀排出,链齿式供料方式具有合理性。

1.3.3 关键部件对供料过程影响分析

结合链齿式供料试验台试验发现,在试验过程中,以下部件对供料效果存在显著影响:直链齿难以切入物料堆中,扰动作用受限;链齿采用单排直列布局,导致作业过程中存在间隔性扰动;顶板与链齿之间缺少配合约束,导致一部分物料会随着链齿运动,越过扰动链板最高点,从上方无序溢出,即物料的排出位置不唯一,物料流无法准确控制;物料排出料仓后需加强喂入辊的协同作用,确保物料能平稳、可控地进入后续工序。因此,为提升链齿式供料装置供料效率、稳定性和可靠性,应针对链齿、链齿布局、顶板和喂入辊等关键部件开展设计。

2 关键结构设计与参数确定

2.1 链齿设计

为降低链齿在拨料过程中的阻力,提高物料回流的平稳性与均匀性,将工作曲面圆弧设计为椭圆曲线形状。椭圆曲线具有曲率连续渐变的特点,减少物料与齿面的摩擦能耗,链齿在与物料接触过程中能够平滑引导物料回流,减少瞬时冲击力,链齿结构示意图如图 4 所示。

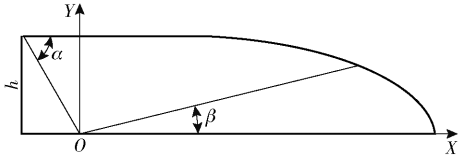


图 4 链齿结构示意图

Fig. 4 Schematic of chain-tooth structure

链齿刃对应的椭圆曲线在直角坐标系下的参数方程可表示为

$$X(t) = a\cos\beta + C_1 \tag{1}$$

$$Y(t) = b\sin\beta + C_2 \tag{2}$$

式中 β——旋转角度,(°)

a、b、C_1、C_2——系数

链齿倾角 α 的确定需同时满足两方面要求:保证齿在与物料接触时,法向与切向的合力分布有利于物料的回拨;在链齿通过上端顶板开口时,减少对物料的上抛作用。以链齿与物料接触点 P 为例,将与链齿接触的物料简化成一个点,在链齿位于扰动链板底部、中部和顶部时,分别对该点的物料进行受力分析,如图 5 所示。其中,ω 为扰动链板转动角速度,v 为运行线速度,F_n 为链齿对物料的法向力,F_t 为链齿对物料的切向力,G 为物料自身重力。

由图 5a 可知,底部链齿物料受力平衡方程为

$$F_{n1}\sin\theta_1 - F_{t1}\cos\theta_1 = ma_{x1} \tag{3}$$

$$F_{t1}\sin\theta_1 + F_{n1}\cos\theta_1 + G = ma_{y1} \tag{4}$$

式中 θ_1——底部链齿对物料切向力与水平夹角

m——目标简化物料质量

F_{n1}——底部链齿对物料的法向力

F_{t1}——底部链齿对物料的切向力

a_{x1}——底部链齿目标简化物料水平方向加速度

a_{y1}——底部链齿目标简化物料竖直方向加速度

由图 5b 可知,中部链齿物料受力物料平衡方程为

$$F_{n2}\sin\theta_2 + F_{t2}\cos\theta_2 = ma_{x2} \tag{5}$$

$$G + F_{n2}\cos\theta_2 - F_{t2}\sin\theta_2 = ma_{y2} \tag{6}$$

式中 F_{n2}——中部链齿对物料的法向力

F_{t2}——中部链齿对物料的切向力

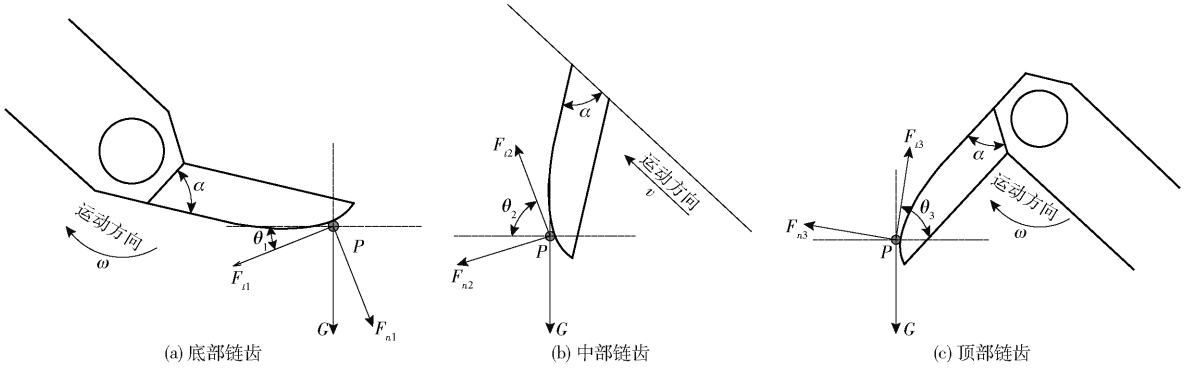
θ_2——中部链齿对物料切向力与水平夹角

a_{x2}——中部链齿目标简化物料水平方向加速度

a_{y2}——中部链齿目标简化物料竖直方向加速

由图 5c 可知,顶部链齿物料受力物料平衡方程为

$$F_{n3}\sin\theta_3 - F_{t3}\cos\theta_3 = ma_{x3} \tag{7}$$



(a) 底部链齿 (b) 中部链齿 (c) 顶部链齿

图 5 物料在 3 个区域受力分析

Fig. 5 Force analysis diagrams of material in three areas

$$F_{n3}\cos\theta_3 + F_{t3}\sin\theta_3 - G = ma_{y3} \tag{8}$$

式中　F_{n3}——顶部链齿对物料的法向力

F_{t3}——顶部链齿对物料的切向力

θ_3——顶部链齿对物料切向力与水平夹角

a_{x3}——顶部链齿目标简化物料水平方向加速度

a_{y3}——顶部链齿目标简化物料竖直方向加速度

在实际生产中，在底部区域，链齿运动方向与物料输送方向相反，因此需有较小拨料范围，对 F_{t1} 有

$$F_{t1} = \mu F_{n1} \tag{9}$$

式中　μ——物料与链齿间的摩擦因数

当 α 减小，链齿更贴近扰动链板，对物料的正压力 F_{n1} 减小，切向力 F_{t1} 减小，拨动物料范围缩小。综上分析，当 α 取 60°时，能在防止物料外抛与保证拨动效率之间取得较优平衡。

2.2　顶板设计

顶板的功能在于，当链齿回转上行至链板装置顶端时，截留齿面附带的多余物料，防止物料被抛出供料仓之外，并引导物料自然回落至料仓，解决物料从扰动链板上方无序溢出的问题，同时，顶板底部加工出与链齿运动轨迹相匹配的齿槽，确保链齿在齿槽内顺畅运行而不发生干涉，顶板结构如图 6 所示。

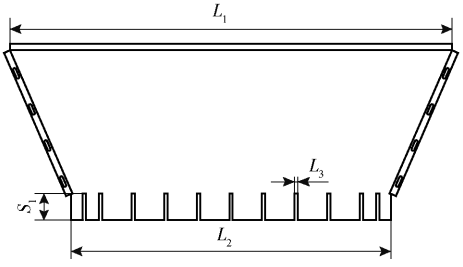


图 6　顶板结构示意图

Fig. 6　Schematic of roof structure

顶板底部开口宽度 L_3 设计为

$$L_3 = h_1 + 2\delta \tag{10}$$

式中　h_1——链齿厚，5 mm

δ——开口侧壁相对于链齿单侧间隙，mm

为保证链齿能顺畅通过齿槽，开口宽度 L_3 取 10 mm；开口长度应不小于链齿通过顶板时的运动行程加安全余量，取开口长度 S_1 为 80 mm；顶板采用倒梯形设计，其外缘与料仓壁紧密贴合，避免形成物料滞留死角。

2.3　链齿安装排布设计

链板由多个链节相连组成，链齿直接安装在链节上，为保证供料过程的均匀性，链齿布局采用 V 形布局形式安装，通过空间相位差将瞬时阻力分散，同时保持扰动连续性，促进物料沿供料方向平稳、均匀地流动。将组成一个 V 形的多个链齿作为一个链齿组，一个链齿组内相邻链齿到达同一平面的时间间隔 Δt_1 为

$$\Delta t_1 = \frac{k_1 p}{v} \tag{11}$$

式中　k_1——链齿组内相邻链齿间隔的链节数

p——链板节距，50 mm

v——链条运行速度，m/s

相邻链齿组中同一位置链齿到达同一平面的时间间隔 Δt_2 为

$$\Delta t_2 = \frac{k_2 p}{v} \tag{12}$$

式中　k_2——链齿组间相邻链齿间隔的链节数

Δt_1 与 Δt_2 叠加产生的扰动周期 T_d 为

$$T_d = \frac{1}{|f_1 - f_2|} \tag{13}$$

式中　f_1——链齿组内相邻链齿扰动频率

f_2——链齿组间相邻链齿扰动频率

通过调节链齿组齿数 N，可以优化扰动频率与幅值，使其既能防止物料大范围堆积，又不破坏物料流的整体性。扰动链板宽为 L_4，链齿组内相邻链齿间隔距离为 L_5，链齿组间相邻链齿间隔的距离为 L_6，结合上述分析及作业需求，每个链齿组包含 9 个链齿。单个链齿组内上下相邻链齿间隔 3 个链板，相邻链齿组间隔 9 个链板，链板宽度 L_4 为 950 mm，V 形半角 φ 取 26.5°，如图 7 所示。

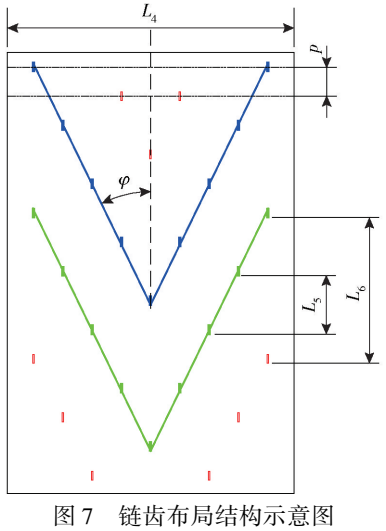


图 7　链齿布局结构示意图

Fig. 7　Schematic of chain-tooth layout structure

2.4　喂入辊设计

喂入辊是一个安装在料仓排料口外侧的圆柱形空心辊，主要作用是将已排出的物料快速向后输送，避免物料在排料口形成堆积，进而影响供料速率，甚至堵塞排料口。喂入辊设计参数主要为直径设计，当直径增大，可以增大喂入辊与物料的接触面积，增

强喂入辊对物料的输送作用,但直径越大,转动惯量越大,喂入辊所需的动力越大。综上分析,结合实际需求,当喂入辊直径取 160 mm 时,能在防止物料堆积与降低所需动力之间取得较优平衡。同时,为增强喂入辊输送效果,喂入辊表面采用滚花处理。

2.5 整体结构

结合上述设计,搭建链齿式供料装置,主要由链齿扰动机构和物料输送机构组成,具体包括输送链板、喂入辊、输送皮带、链齿、扰动链板、驱动链、顶板、液压马达等。其中,液压马达与扰动链板之间通过链传动形式实现动力传递,通过改变液压马达转速,实现扰动链板转速调整。为保证扰动链板与物料之间充分接触,扰动链板始终处于张紧状态,链齿式供料装置结构如图 8 所示,技术参数如表 1 所示。

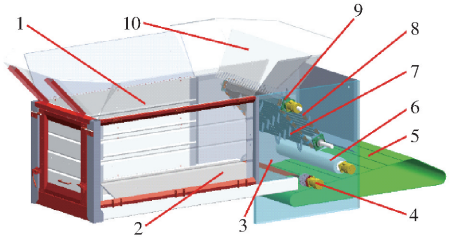


图 8 链齿式供料装置结构示意图

Fig. 8 Structural diagram of chain-tooh feeding device

1. 料仓侧壁 2. 输送链板 3. 排料口 4. 液压马达 5. 输送皮带 6. 喂入辊 7. 链齿 8. 扰动链板 9. 驱动链 10. 顶板

表 1 饲草碎料供料装置技术参数

Tab. 1 Technical parameters of profiling system and prototype

参数	数值
料仓尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 000×1 000×900
排料口宽度/mm	1 000
扰动链板转速调节范围/(r·min^{-1})	0~20
扰动链板安装角度调节范围/(°)	40~50

本研究设计的链齿式饲草碎料供料装置主要以固定场地作为工作环境,在此条件下避免不规范的作业方式对供料速度、震动冲击等状态产生影响。相关研究显示,针对含水率 65%~75% 的青贮物料,中大型固定式圆捆机的物料输送效率须达到 120~250 kg/min,为了保证供料作业效率,要求供料装置所能适用的作业速度应与正常工作速度范围保持一致。

3 试验

3.1 试验设计

为研究链齿式供料装置的最优作业参数,以扰动链板转速、喂入辊转速作为试验因素,以扰动链板平均油压、供料时间、出仓物料横向高度变异系数作为评价指标,其中,扰动链板油压可以反映整个供料过程中物料的顺畅流动情况;供料时间可以反映链齿式供料装置的作业效率;出仓物料横向高度变异系数可以反映供料的均匀性,即分别从供料顺畅性、作业效率、供料均匀性 3 个维度对链齿式供料装置性能进行评价。为探究扰动链板转速、喂入辊转速对各评价指标参数的影响,根据预试验结果,为扩大因素取值范围,设计中心复合正交试验(Central composite design, CCD),各试验因素编码如表 2 所示。

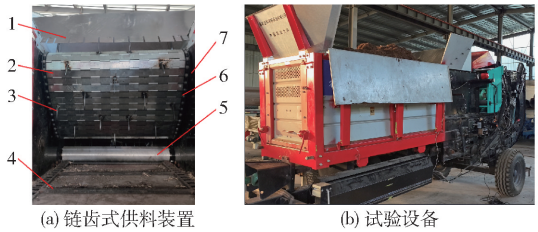
表 2 供料试验因素编码

Tab. 2 Factors and coding of feeding test r/min

编码	因素	
	扰动链板转速	喂入辊转速
-2	9	70
-1	11	75
0	13	80
1	15	85
2	17	90

3.2 材料和方法

试验于 2025 年 5 月 30 日在新疆同力专利产品开发有限公司进行,试验过程如图 9 所示。圆捆机整机动力由 40 kW 三相电机提供,以青贮玉米为试验对象开展装机供料试验,选择与 1.3.1 节中一致的青贮玉米裹包物料,用烘干法重新测得青贮玉米碎料平均含水率为 73.53%。试验前,一次性将物料均匀加至料仓中,根据链齿式供料试验装置容积,试验时单次加料量为 300 kg。



(a) 链齿式供料装置 (b) 试验设备

图 9 试验场景

Fig. 9 Test scenarios

1. 顶板 2. 扰动链板 3. 链齿 4. 输送链板 5. 喂入辊 6. 驱动链 7. 料仓侧壁

在进行链齿式供料装置试验时,通过在扰动链板液压马达入口处安装油压传感器(型号 PT131,量程 0~16 MPa),记录油压随时间的变化;通过记录从料仓开始供料到料仓排出所有物料的时间,作为供料时间;物料在排料口输送皮带上形成凹凸不平的上表面,通过观察并分析物料上表面高度随时间的变化情况可以反映喂料速率的均匀性。在排料口沿物料流动方向宽度上的中间位置,从上往下竖直投射一条沿物料流动方向的激光线,利用高速摄像

机(120 f/s)连续采集物料表面激光投影所形成的轮廓图像。由于输送皮带上表面会在顶点处弯曲，因此对于物料高度的提取只限于上升阶段的平面内。当输送皮带空载运行时，激光投影会在皮带上形成一条基准直线。使用 Matlab 软件对采集到的图像进行识别和数据提取。首先，绘制多边形区域以确定识别范围，排除输送皮带上升段平面之外的物料。然后，将空载运行时的基准直线标记为蓝色基准线(图 10)，将物料经过时激光投影在物料上表面形成的轮廓标记为橙色高度线。输送皮带线速度为 1.19 m/s，图中上升段平面长度是 660 mm，由此得出物料通过该段的时间为 0.55 s。因此，每隔 1 s 提取一帧图像进行数据统计。在每一帧图像中，将橙色线沿蓝色线方向等距划为 100 个样本点，提取各样本点到蓝线的垂直距离作为该点物料高度。计算每一帧图像中 100 个样本点物料高度的平均值，再计算整个喂料过程每一帧图像高度平均值的变异系数，作为供料量均匀性的评价指标。

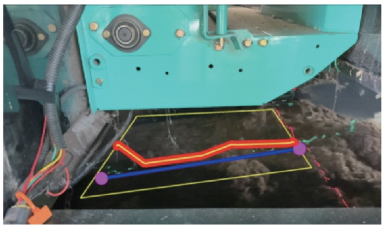


图 10　Matlab 中的激光线识别结果

Fig. 10　Result of laser line recognition in Matlab

3.3　试验结果分析

3.3.1　试验结果

按照 3.1 节中方法进行中心组合试验，结果如表 3 所示，X_1、X_2为因素编码值。应用 Design-Expert 13.0 软件进行方差分析，剔除不显著项，结果如表 4～6 所示。

表 3　中心组合试验结果

Tab. 3　Results of central composite test

试验序号	因素 X_1	因素 X_2	油压平均值 Y_1/MPa	高度变异系数 Y_2/%	供料时间 Y_3/s
1	0	0	1.49	67.36	117
2	1	−1	1.76	66.54	133
3	0	0	1.66	54.12	122
4	2	0	1.92	55.43	106
5	0	2	1.50	29.81	128
6	−1	−1	1.54	76.84	142
7	0	0	1.68	67.27	120
8	1	1	1.74	36.68	113
9	−2	0	1.21	73.07	183
10	−1	1	1.55	44.94	148
11	0	0	1.55	73.75	109
12	0	−2	1.69	68.61	111
13	0	0	1.59	74.11	113

表 4　油压平均值方差分析

Tab. 4　Variance analysis of average oil pressure

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	0.29	2	25.88	<0.001 **
X_1	0.28	1	49.52	<0.001 **
X_2	0.01	1	2.25	0.164 6
残差	0.06	10		
失拟	0.03	6	0.87	0.584 4
误差	0.02	4		
总和	0.35	12		

注：** 表示差异极显著($P<0.01$)，下同。

表 5　高度变异系数方差分析

Tab. 5　Variance analysis of height variable coefficient

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	2 338.40	3	15.25	<0.001 **
X_1	241.56	1	4.73	0.057 7
X_2	1 618.43	1	31.66	<0.001 **
X_2^2	478.40	1	9.36	0.013 6 *
残差	460.02	9		
失拟	198.32	5	0.61	0.704 4
误差	261.69	4		
总和	2 798.42	12		

注：* 表示差异显著($0.01\leqslant P<0.05$)。

表 6　供料时间方差分析

Tab. 6　Variance analysis of feeding time

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	4 508.68	3	14.79	<0.001 **
X_1	3 267.00	1	32.15	<0.001 **
X_2	33.33	1	0.33	0.580 8
X_1^2	1 208.34	1	11.89	0.007 3 **
残差	914.56	9		
失拟	803.76	5	5.80	0.056 6
误差	110.80	4		
总和	5 423.23	12		

3.3.2　回归模型建立

由表 4～6 可知，模型 P 值均小于 0.05，说明模型影响显著，回归结果具有较高的可靠性；失拟项的 P 值均大于 0.05，说明失拟项影响不显著，回归模型拟合度较高。

剔除不显著因素后，构建各试验因素与油压平均值 Y_1、高度变异系数 Y_2、供料时间 Y_3 的回归方程为

$$Y_1 = 1.61 + 0.15X_1 - 0.033X_2 \quad (14)$$

$$Y_2 = 64.7 - 4.49X_1 - 11.61X_2 - 4.38X_2^2 \quad (15)$$

$$Y_3 = 120.11 - 16.5X_1 + 1.67X_2 + 6.96X_1^2 \quad (16)$$

3.3.3　最优参数组合与验证试验

根据上述分析，结合实际供料要求，以尽可能小的油压平均值、高度变异系数和供料时间为优化目

标,利用 Design-Expert 软件求解链齿式供料装置的最优工作参数组合以及对应的响应值,结果表明:当扰动链板转速取 13 r/min,喂入辊转速取 85 r/min,此时油压平均值为 1.59 MPa,供料时间为 122 s,高度变异系数为 48.06%,达到最优。在最优参数组合下进行验证试验,测得油压平均值为 1.48 MPa,供料时间为 128 s,高度变异系数为 44.81%,各响应与优化结果基本一致。

此外,由表 3 可知,链齿式供料装置的油压平均值在 1.21 ~ 1.92 MPa 之间,而 9YYB12 型智能青饲料打捆缠膜一体机的供料系统液压实测值为 12 MPa[26],可见本研究提出的链齿式供料方式在降低能耗方面,相比传统供料装置有明显提升。

4 结论

(1)基于圆草捆供料装置作业要求,提出了一种链齿式供料方式,搭建了链齿式供料试验台,分析验证了链齿式供料方式可行性及运行特点。在供料过程中,扰动链板可以有效破坏上层物料间的纤维交织和黏附,改善料仓中物料的流动状态,下层物料会在输送链板的作用下持续供料,该方式可以实现物料的均匀排出。

(2)完成了关键装置设计,基于链齿式供料过程物料运移规律分析,链齿以 60°倾斜角安装在链板上,单个链齿组包含 9 个链齿,链齿组采用 V 形布局,顶板采用倒梯形设计;试制了链齿式饲草碎料均匀供料装置,装置运行稳定,基本满足设计要求。

(3)探究了扰动链板转速、喂入辊转速对扰动链板油压平均值、供料时间、出仓物料横向高度变异系数的影响。进行了两因素五水平中心复合正交试验,试验结果表明:扰动链板转速对油压、供料时间有显著影响,喂入辊转速对高度变异系数有显著影响,当扰动链板转速 13 r/min、喂入辊转速 85 r/min 的工作参数组合时,供料效果最好,此时平均油压为 1.48 MPa,供料时间为 128 s,高度变异系数为 44.81%。

参 考 文 献

[1] 张姬, 付海, 宋占华, 等. 青贮圆捆机压捆机构研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(4): 204 - 210.
ZHANG Ji, FU Hai, SONG Zhanhua, et al. Research status and development trend of press mechanism for silage round baler [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(4): 204 - 210. (in Chinese)

[2] BERNARDES T F, DANIEL J L P, ADESOGAN A T, et al. Silage review: unique challenges of silages made in hot and cold regions[J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101(5): 4001 - 4019.

[3] COBLENTZ W K, AKINS M S. Silage review: recent advances and future technologies for baled silages[J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101(5): 4075 - 4092.

[4] SHANG Yehua, MENG Zhijun, CONG Yue, et al. Development of a control system with remote monitoring function for round baler[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 182: 106044.

[5] BALINGBING C, VAN HUNG N, ROXAS A P, et al. An assessment on the technical and economic feasibility of mechanized rice straw collection in the Philippines[J]. Sustainability, 2020, 12(17): 7150.

[6] 王德成, 贺长彬, 武红剑, 等. 苜蓿生产全程机械化技术研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 1 - 25.
WANG Decheng, HE Changbin, WU Hongjian, et al. Review of alfalfa full-mechanized production technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 1 - 25. (in Chinese)

[7] LI Sibiao, ZHANG Xiaohang, MA Pengbo, et al. A review of research progress in the compaction of major crop waste by mechanical equipment[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, 213: 115484.

[8] 卢琦, 刘立晶, 郑德聪, 等. 燕麦生产全程机械化技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊1): 118 - 139.
LU Qi, LIU Lijing, ZHENG Decong, et al. Research progress of mechanization technology and equipmentin whole process of oat production[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 118 - 139. (in Chinese)

[9] 高东明, 王德成, 李杰, 等. 青饲圆捆机对数螺线式成形装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 118 - 122.
GAO Dongming, WANG Decheng, LI Jie, et al. Design and test of logarithmic spiral round baler chamber[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 118 - 122. (in Chinese)

[10] 李叶龙, 王德福. 钢辊式圆捆机卷捆功耗中关键生产信息的提取方法[J]. 沈阳农业大学学报, 2020, 51(5): 530 - 539.
LI Yelong, WANG Defu. Extraction method of key production information in baling power consumption of steel-roller round baler[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2020, 51(5): 530 - 539. (in Chinese)

[11] 雷军乐, 王德福, 李利桥, 等. 不同铺放状态下稻秆卷捆压缩特性试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2015, 46(5): 581 - 587.
LEI Junle, WANG Defu, LI Liqiao, et al. Experiment on straw-baling compression characteristics in different laying status [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2015, 46(5): 581 - 587. (in Chinese)

[12] ZHAO Zhan, HUANG Hedong, YIN Jianjun, et al. Dynamic analysis and reliability design of round baler feeding device for rice straw harvest[J]. Biosystems Engineering, 2018, 174: 10 - 19.

[13] 房佳佳, 张永, 杨明韶, 等. 紫花苜蓿圆捆机卷压过程的应力松弛特性与模型建立[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 50 - 56.

FANG Jiajia, ZHANG Yong, YANG Mingshao, et al. Stress relaxation behavior and modeling of alfalfa during rotary compression[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(16): 50 - 56. (in Chinese)

[14] 陈美舟, 徐广飞, 宋志才, 等. 全株青贮玉米径向局部压缩特性试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(5): 1197 - 1207.
CHEN Meizhou, XU Guangfei, SONG Zhicai, et al. Experimental study of radial partial compression characteristics of whole silage corn[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2022, 52(5): 1197 - 1207. (in Chinese)

[15] MARALDI M, MOLARI L, REGAZZI N, et al. Analysis of the parameters affecting the mechanical behaviour of straw bales under compression[J]. Biosystems Engineering, 2017, 160: 179 - 193.

[16] 陈天佑, 贾洪雷, 李名伟, 等. 保压/保型抑制压后切碎玉米秸秆块回弹机理[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 51 - 58.
CHEN Tianyou, JIA Honglei, LI Mingwei, et al. Mechanism of restraining maize stalk block spring back under pressure maintenance/strain maintenance[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(1): 51 - 58. (in Chinese)

[17] 夏俊芳, 张朋, 苑宏文, 等. 水稻秸秆离散元柔性模型参数标定与试验验证[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 174 - 184.
XIA Junfang, ZHANG Peng, YUAN Hongwen, et al. Calibration and verification of flexible rice straw model by discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 174 - 184. (in Chinese)

[18] LI Sibiao, HUAN Xiaolong, WANG Tianyi, et al. Biomechanical properties and discrete element modeling of PSR stalks during silage harvest[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 217: 108644.

[19] HUAN Xiaolong, LI Sibiao, WANG Lei, et al. Study on silage mixing device of King Grass stalk particles based on DEM simulation and bench test[J]. Powder Technology, 2024, 437: 119581.

[20] TURNER A P, SAMA M P, BRYSON L S, et al. Effect of stem crushing on the uniaxial bulk compression behaviour of switchgrass and miscanthus[J]. Biosystems Engineering, 2018, 175: 52 - 62.

[21] FASICK G, LIU Jude. Lab scale studies of miscanthus mechanical conditioning and bale compression[J]. Biosystems Engineering, 2020, 200: 366 - 376.

[22] 张安琪, 孟志军, 陈立平, 等. 小型方捆机草捆动态称量系统信号分析与处理[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 243 - 248.
ZHANG Anqi, MENG Zhijun, CHEN Liping, et al. Signal analysis and processing of dynamic weighing system for small square baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 243 - 248. (in Chinese)

[23] LOFTIS P J, KIRK K R, MUELLER J D, et al. Development of a round bale weighing system for spring-loaded bale ramps [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2019, 35(6): 969 - 977.

[24] 雷军乐, 王德福, 李东红, 等. 钢辊式圆捆机旋转草芯形成影响因素分析与优化[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 18 - 25.
LEI Junle, WANG Defu, LI Donghong, et al. Influence factors analysis and optimization of forming rotary straw core by steel-roll round baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 18 - 25. (in Chinese)

[25] 尤泳, 马朋勃, 陈科, 等. 基于卷压力的圆捆机成捆密度监测系统设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(9): 158 - 166.
YOU Yong, MA Pengbo, CHEN Ke, et al. Design and experiment of density monitoring system for round baler based on rolling pressure[J]. Journal of China Agricultural University, 2024, 29(9): 158 - 166. (in Chinese)

[26] 张成保, 刘学峰, 李青江, 等. 9YYB12 型智能青饲料打捆缠膜一体机液压系统的设计[J]. 农机化研究, 2019, 41(7): 116 - 120.
ZHANG Chengbao, LIU Xuefeng, LI Qingjiang, et al. Design research of model 9YYB12 intelligent greenfeed banding wrapping AIO machine hydraulic system [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(7): 116 - 120. (in Chinese)